

К. В. Хацевский,
Омский государственный технический университет – ОмГТУ,
Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

In article scaling problems on heating surfaces are considered. Ways of decrease in intensity of emergence a scum process are offered. Experimental dependences of the minimum temperatures of the heating surfaces on hardness of water are constructed.

В промышленном оборудовании взаимодействие воды с нагревающей поверхностью сопровождается термохимическими процессами образования карбонатных соединений (накипи), которые определяются жесткостью воды и термомассообменными условиями электронагрева.

Общая жесткость воды состоит из карбонатной и некарбонатной жесткости. Первая обусловлена содержанием в воде бикарбонатов кальция и магния, выпадающих при нагревании воды в виде шлака (накипи), а вторая – содержанием сернокислых, хлористых, кремнекислых, азотнокислых и фосфорнокислых соединений кальция, магния, не выпадающих в большом количестве из раствора даже при его кипячении. Температурные условия на нагревающей поверхности определяются интенсивностью теплового потока и уровнем конвективного взаимодействия воды с этой поверхностью. Электроустановки, выпускаемые промышленностью, обеспечивают нагрев воды при плотностях теплового потока $(1-8) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. Длительность безремонтного периода работы таких систем на основе трубчатых электронагревателей (ТЭН) ограничивается скоростью отложений (накипи) на поверхности нагревателей и при толщине отложений в 0,5 мм составляет не более 8–10 тыс. часов. Современные электродные электродкотлы, в которых нагрев воды осуществляется за счет пропускания через воду электрического тока, сохраняют свои нагрузочные характеристики в течение 1000–1500 часов. Затем происходит снижение мощности из-за накопления на электродах отложений.

Количественный анализ термохимических процессов образования накипи показал, что предотвратить или существенно снизить скорости солеотложений

на нагревающих поверхностях возможно двумя путями. Первый путь связан с организацией в рабочем пространстве установок вблизи нагревающих поверхностей специальных термогидродинамических режимов движения нагреваемой воды, обеспечивающих интенсивное протекание объемных процессов солеобразования с локальным перегревом воды вблизи поверхности нагрева до температуры насыщения. Такое кипение возникает при плотностях теплового потока $q_s > (6-8) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ независимо от температуры нагреваемой воды. При этом за счет направленной перпендикулярно поверхности нагрева термодиффузии обеспечивается предотвращение формирования из образующихся частиц солей отложений на поверхности нагрева. Второй путь снижения накипеобразования связан с реализацией нагрева воды при плотностях теплового потока $q_s = (1-5) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ до температур, при которых интенсивного образования накипи не происходит ($T \leq 70 \text{ }^\circ\text{C}$).

Величина минимальной температуры нагревающей поверхности, исключающей осаждение накипи при конкретной карбонатной (J_k) и некарбонатной (J_n) жесткости воды, определяются из следующих зависимостей:

– для аккумуляционных систем нагрева

$$T_{\min} = 15 + [600 / (2,8 \cdot J_k + 4)] + [800 / (2,8 \cdot J_k)^4]; \quad (1)$$

– для проточных замкнутых систем нагрева

$$T_{\min} = 80 + 1,67 \cdot \Theta - 14 J_k - [112 J_n / (48 - \Theta)], \quad (2)$$

где Θ – окисляемость оборотной (нагреваемой) воды ($\text{мг O}_2/\text{кг}$).

Интенсивность накипеобразования карбонатных отложений определяется скоростью распада водорастворимых бикарбонатных соединений в объеме нагреваемой воды, температурой ее нагрева выше концентрацией накипеобразующих элементов, временем пребывания воды в зоне с температурами выше T_{\min} . Скорость протекающих реакций пропорциональна числу соударений Z между реагирующими частицами. Эти реакции происходят лишь при соударениях, в которых сталкивающиеся частицы должным образом ориентированы относительно друг друга и обладают энергией, достаточной для

преодоления потенциального барьера реакции (энергия активации). В общем виде скорость таких биомолекулярных реакций (W) может оцениваться по выражению

$$W = Z \cdot p \cdot e^{E/RT}, \quad (3)$$

где p – стерический фактор, показывающий, какова вероятность необходимой взаимной ориентации сталкивающихся частиц (зависит от вихревого перемешивания, термодиффузии и электродиффузии в электрических и магнитных полях); E – энергия активации реакции; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; Z – число столкновений между частицами в единицу времени в единице объема.

Поскольку Z зависит от скоростей движения (числа Рейнольдса), времени пребывания частиц в области температур $T > T_{min}$ и концентрации взаимодействующих частиц. Скорость W пропорциональна произведению концентраций реагирующих частиц и выражается уравнением реакций второго порядка

$$W = \beta \cdot C_1 \cdot C_2, \quad (4)$$

где β – коэффициент массопередачи (постоянная скорости накипеобразования), C_1 и C_2 – концентрации реагирующих частиц (например, Mg^{2+} или Ca^{2+} и CO_3^{2-}). Для конкретного рассматриваемого процесса накипеобразования концентрация C_2 (CO_3^{2-}) $\gg C_1$ (Mg^{2+} или Ca^{2+}) и C_2 не может лимитировать скорость реакций. Поэтому скорость образования накипи в зависимости от карбонатной жесткости воды определяется из выражения

$$Ж_{\text{мг·экв / кг}} = ([Ca^{2+}] / 20,4) + ([Mg^{2+}] / 12,6). \quad (5)$$

Общая жесткость природной воды изменяется от 3,18 мг·экв/кг (конец зимы) до 1,6 мг·экв/кг (в период паводка), а карбонатная от 2,95 мг·экв/кг до 1,4 мг·экв/кг. Подземные воды могут иметь жесткость до 6–8 мг·экв/кг.

При математическом описании кинетики образования накипи примем допущение, что вода по всему нагреваемому объему, за исключением тонкого диффузионного слоя у нагревающей поверхности, интенсивно перемешивается. Это обеспечивает квазипостоянство в ограниченный период времени жесткости

воды по всему объему (V) и некоторый градиент концентрации в диффузионном слое. Кроме этого, будем учитывать, что в задачу данного исследования не входит рассмотрение термодинамических условий накипеобразования и, следовательно, любое карбонатное соединение $(Ca, Mg, Fe)CO_3$, нерастворимое в воде, оседает на поверхности нагрева и выводится из рассматриваемого диффузионного процесса. Это дает возможность принять исходное положение: любое уменьшение жесткости нагреваемой воды в процессе ее нагрева можно приравнять массе образующейся накипи.

На рис. 1 приведены зависимости минимальных температур нагревающих поверхностей от жесткости воды, при которых накипеобразование практически не наблюдается.

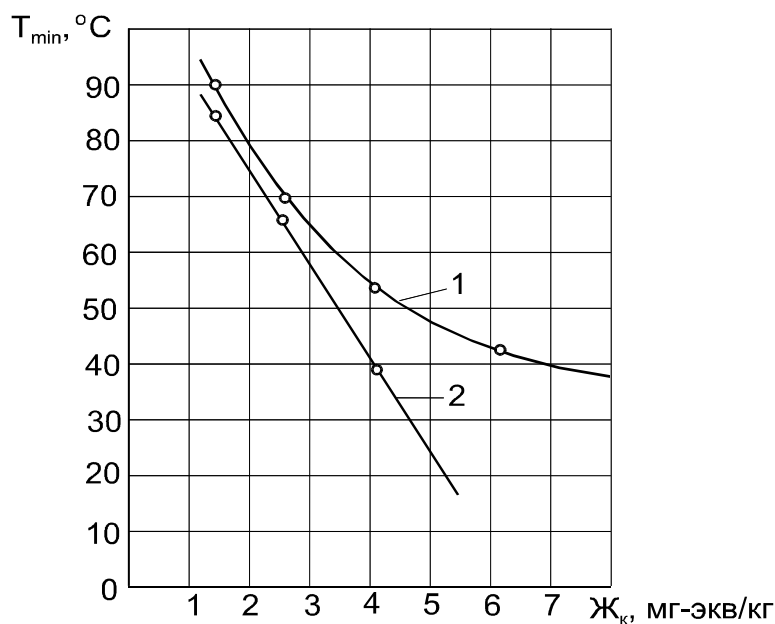


Рис. 1. Зависимость минимальных температур нагревателя T_{min} от жесткости воды
1 – прямоточная система, 2 – обратная система

На рис. 2 приведены зависимости интенсивности накипеобразования при $T > T_{min}$ от величины карбонатной жесткости при температуре нагревателя $T=150\text{ }^{\circ}C$ (кривая 1) и $T=100\text{ }^{\circ}C$ (кривая 2).

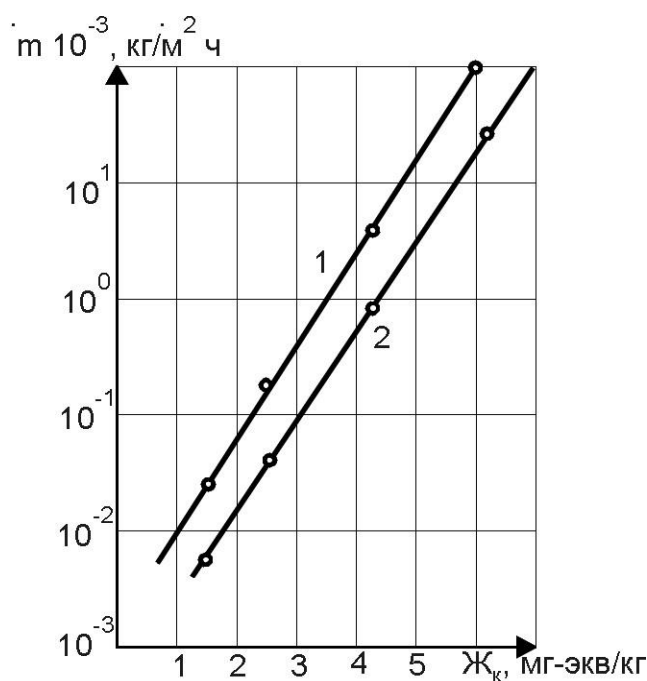


Рис. 2. Зависимости интенсивности накипеобразования m от величины карбонатной жесткости $Ж_k$ при температуре нагревателя $T=150\text{ °C}$ (1) и $T=100\text{ °C}$ (2)

Полученные характеристики позволяют рассчитать срок службы плоского плазменно-напыленного нагревателя при увеличении его температуры за счет появления слоя накипи до допустимой температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чередниченко, В. С. Индукционные установки для нагрева и электрофизической обработки жидкостей / В. С. Чередниченко, К. В. Хацевский // Индукционный нагрев. – 2012. – № 22. – С. 47–48.
2. Хацевский, К. В. Энергоэффективные технологии электронагрева жидкостей и газов: монография / К. В. Хацевский, Т. В. Гоненко. – Омск: Изд-во ОмГТУ. – 2013. – 176 с.